



TITLE:

# <大学の研究・動向> 高速度カメラを用いた周辺プラズマ挙動の可視化

AUTHOR(S):

水内, 亨; 南, 貴司; 小林, 進二

---

CITATION:

水内, 亨 ...[et al]. <大学の研究・動向> 高速度カメラを用いた周辺プラズマ挙動の可視化. Cue 2009, 21: 3-7

ISSUE DATE:

2009-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/84707>

RIGHT:

## 大学の研究・動向

# 高速度カメラを用いた周辺プラズマ挙動の可視化

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野  
 エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 基礎プラズマ科学講座  
 核融合エネルギー制御分野  
 教授 水 内 亨  
 准教授 南 貴 司  
 助教 小 林 進 二

## 1. はじめに

21世紀以降のエネルギー源は、人類の持続的発展を支えるに足る十分な量を提供できることばかりではなく、地球規模の環境保全からの要請を満たすことも求められています。化石燃料を代替するエネルギー源としては、核分裂、核融合、風力・太陽光発電等の再生可能エネルギー等が挙げられますが、中でも、核融合エネルギーについては、安全性・環境適合性・資源量等の観点で優れた特性を潜在的に有しています。1958年の第2回原子力平和利用国際会議開催に当たって、先進国の申し合わせにより制御熱核融合研究は公開されることとされ、爾来、世界の主要国で活発な研究開発が、あるときは競い合い、あるときは共同して行われています。我が国においても1950年代に手探り段階から開始された核融合研究開発は、国際プロジェクトとして進められている国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor：ITER）計画への参加へと展開し、さらに日欧の協力により、ITERの先の原型炉に向けた研究開発が「幅広いアプローチ（Broad Approach：BA）計画」として開始されています。

核融合プラズマは、開放形の非線形媒質であり、プラズマパラメータの向上に伴い、それまでは表面化しなかったような事象が現れることがしばしば見受けられ、それらをきちんと理解して進んで行かねばなりません。したがって、核融合炉の実現を目指す研究においては、上記ITER計画やBA計画に代表される「開発研究」と、それを支える「学術研究とそれに基づく人材育成体制」とを包含する総合的研究の推進が重要です。前者は、特定の技術開発目標を一定期間に達成する目的直結型の研究開発であるのに対して、後者、特にこれを担う大学等の研究は、研究者の自由な発想に基づいた、学理の探求に基づく当該研究分野の学問的体系化を目指す学術研究であると言えます。人材育成の観点からは、核融合エネルギーフォーラム ITER・BA技術推進委員会 ロードマップ等検討ワーキンググループが、ケーススタディとして行った、ITER計画やBA計画を中心にトカマク原型炉へ向けた研究を進めるための人材に関する検討〔1〕によれば、今後15年間で約400名の人材確保が必要とされており、大学等の役割、大学等への期待は大きいと言えます。

京都大学では、1958年、基礎物理学研究所長 湯川秀樹教授（当時）の提唱によりスタートした高温プラズマ懇談会をもとに、理学部、工学部、教養学部、基礎物理学研究所及び工学研究所（当時）にまたがる核融合研究グループ（Project Helicon）が発足、共同研究がスタートしました〔2〕。その中で開始された、宇尾光治工学部助手（当時）発案によるヘリオトロン磁場配位を用いた高温プラズマの発生・閉じ込め・制御に関する研究の流れは、一方では、京都大学におけるヘリオトロンE装

置によるヘリカルヘリオトロン磁場の核融合炉への原理検証実験を経て、大学共同利用法人自然科学研究機構核融合科学研究所のLHD装置へ引き継がれ、パラメータ拡張段階の実験研究へと進み、著しい成果を上げています。他方、ヘリオトロン磁場のさらに可能性を求めて新たに提案された磁場配位、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場〔3〕の概念開発研究を行うため、私たちは、ヘリオトロンJ装置を建設〔4〕、研究を進めているところです。ヘリオトロンJ研究は、佐野研究室（エネルギー理工学研究所）、近藤研究室（エネルギー科学研究科）、水内研究室（エネルギー理工学研究所）、長崎研究室（エネルギー理工学研究所）の四つの電気系関連研究室に加え、国内外の多くの研究グループ、研究者との共同研究によって進められています。大学院生は、エネルギー科学研究科に所属していますが、電気系教室の学部生には、卒業研究等で参加してもらっています。

ヘリオトロンJ研究の進展については、これまで、CUE誌上でも、研究室紹介等の中で随時紹介されているところです。本記事では、最近急速に性能が向上してきた高速ビデオカメラを用いた、周辺プラズマ挙動の可視化に関する話題を紹介します。この研究は、エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究ならびに核融合科学研究所双方向型共同研究により、広島大学ならびに核融合科学研究所との共同研究として実施しているものです。

## 2. 磁場閉じ込め装置における周辺プラズマ

トーラス状磁場を用いたプラズマ閉じ込め実験装置においては、高温の炉心プラズマは、磁力線がプラズマを取り囲む真空容器壁等の、いわゆるプラズマ対向壁を横切らない「閉じた空間」に高温の炉心プラズマを生成・閉じ込めることにより、炉心プラズマが直接プラズマ対向壁表面に接触することを防いでいます。この「閉じた空間」の磁力線は、入れ子状のトーラス面（磁気面）を形成しており、その一番外側のものを最外殻磁気面あるいはセパトリクス（separatrix）と呼んでいます。最外殻磁気面とプラズマ対向壁との間では、磁力線はプラズマ対向壁表面を横切っており、スクレイプ・オフ層（Scrape Off Layer：SOL）と呼ばれます。炉心プラズマから最外殻磁気面を横切ってSOLに流出したプラズマ粒子と熱は、主に磁力線方向に輸送され、プラズマ対向壁に流入するため、SOLは、炉心プラズマと材料表面とのインターフェースであると言えます。この観点から、最外殻磁気面の少し内側までも含めた領域におけるプラズマを、周辺プラズマ、あるいは境界プラズマと呼び、その領域におけるプラズマ挙動ならびにプラズマ-材料相互作用で生じた中性粒子や不純物粒子の挙動の理解とそれにに基づく正確な予測ならびに制御法開発が、核融合開発には不可欠な要素のひとつとなっています。

周辺プラズマの輸送に関し、従来、磁力線に沿った古典的輸送（クーロン衝突に基づく輸送）と磁場に垂直な異常輸送（プラズマ乱流に基づく輸送）で記述できる準静的なプロセスが考えられていました。しかしながら、近年、SOLプラズマの径方向（磁場に垂直方向）の密度分布が、SOLの最外殻磁気面に近い領域と離れた領域で異なっており、上記のような、磁場に平行と垂直な方向での拡散的輸送のバランスから期待されるような単純な指数関数的分布となっていないことが明らかになってきました。この観測を説明するためには、磁力線を横切る何らかの対流項が必要であることが予測され、このことと、多くの実機において周辺プラズマ中に観測されている間欠的な現象との関連が指摘され、SOLプラズマの動的な描像の重要性に対する認識が高まっています。特に、最近の研究に

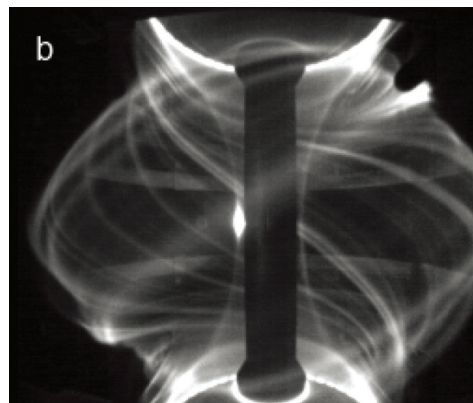


図1. 周辺プラズマ構造の可視画像  
(MASTでの観測例。7.5kFPS)

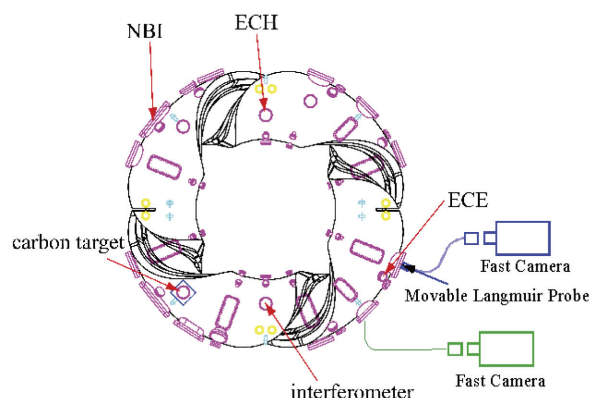


図2. ヘリオトロンJにおける  
高速ビデオカメラの配置

を用いて撮影された周辺プラズマの可視光画像 [5] ですが、磁力線に沿ったフィラメント状の構造の存在が見事に捉えられています。このようなフィラメント状の構造を保って、径方向に動いて行く様も観測されており、上述のPlasma Blobとの関連に興味もたれています。

### 3. ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ挙動の可視化

ヘリオトロンJにおいても、周辺プラズマ挙動を観測、その動的構造変化を可視化するために高速度ビデオカメラを用いて周辺プラズマからの発光の2次元計測を行っています。図2は、高速ビデオカメラの配置を示すものです。ヘリオトロンJでは、装置の制約上、残念ながら、前述のMAST装置での観測のようにプラズマ全体を見渡す視野は取れませんが、現在、1台の高速ビデオカメラを用いて、トーラスの大半径方向の視線、あるいは接線方向の視線を選択して観測しています。大半径方向からの観測では、静電プローブの電極付近も同一フレーム内に観測することが出来ます。

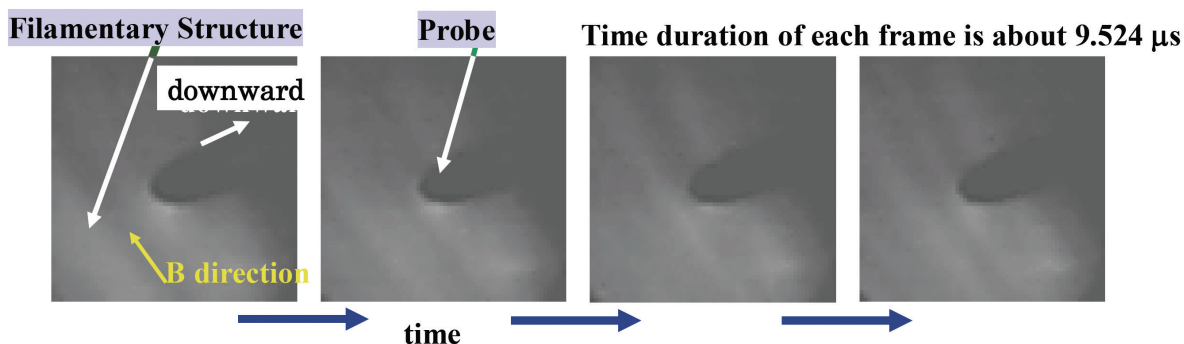


図3. 大半径方向からの観測例。(ECHプラズマ)  
80kFPSで撮影された連続する4フレームを例示した。

図3は、そのような観測の一例で、電子サイクロトロン共鳴を利用して加熱されたプラズマ（ECHプラズマ）を撮影したものです。画像を見ると、磁力線方向に沿った筋状の濃淡があり、フィラメント構造の存在を示しています [6]。図には、静電プローブの電極支持部（電極自身は、この陰に隠れています。）も写っています。静電プローブによるイオン飽和電流と高速ビデオ画像における電極付近の画素における信号強度の時間変化を図4に示します。両信号に、時間的に同期した間欠的なバーストがあることがわかります。画像データだけだと、そこに見られる濃淡構造が、視線方向のどの位置に生じているものか、必ずしも明確に判断できませんが、このように局所的な計測が可能な静



電プローブ計測と組み合わせることにより、それが、プローブ位置付近のものであることが見えてきます。逆に、静電プローブによる局所的な観測のみでは、このようなマクロな構造の存在を推測することは、必ずしも容易ではなかったと思います。

静電プローブで観測されるイオン飽和電流は、電子温度にも関係しますが、主としてプラズマ密度に強く依存しますから、画像に表れた筋状の濃淡、したがって、フィラメント状の構造は、プラズマ密度の違うプラズマの塊により出来ているものと解釈することが出来ます。また、連続したフレームの比較から、フィラメント状の構造が、時間的に、磁力線を横切る方向に移動していることもわかってきました。

このような周辺プラズマの構造とその時間的变化は、生データをもとに二次元位相図として整理すると、より明確に可視化することが出来ます。図5は、接線方向から撮影した高速ビデオ画像をFFT解析して得られた二次元位相図の時間変化を示すもので、同じ位相関係にある場所が同じ色で示されています[7]。接線方向からの撮影では、フィラメント状の構造の径方向やポロイダル方向への動きが観測できる可能性があります、残念ながら、今のところ径方向への動きを明らかにするまでには至っていません。それはともかく、図では、ひとつのECHプラズマ放電中に観測される閉じ込め状態の異なる放電モード(Lモード及びHモード)[8]ならびに、LモードからHモードへ自発的に遷移(L-H transition)する状態での位相構造の時間変化が示されています。紙面の関係で、図の詳細は省きますが、図中楕円で囲まれた領域に着目すると、図中に示した矢印の動きでわかるように、閉じ込め状態が異なると、位相構造の変化方向が逆転すること、遷移時には、この変化が停滞していることが見出されました。現在の観測では、その視野が限られているため、上述のような周辺プラズマ中のフィラメント状構造の移動が、ポロイダル方向の回転に起因するものかどうか断定は出来ませんが、静電プローブで観測される周辺プラズマ電位の径方向分布の変化は、 $E \times B$  リフトドによる回転運動の可能性を示唆しています。

#### 4. おわりに

電子技術、特に半導体技術の発達に伴い、多量のデータの高速処理が可能となり、高速ビデオカメラの撮影速度ならびに画素数の飛躍的増加をもたらしました。これにより、高速ビデオカメラを用い

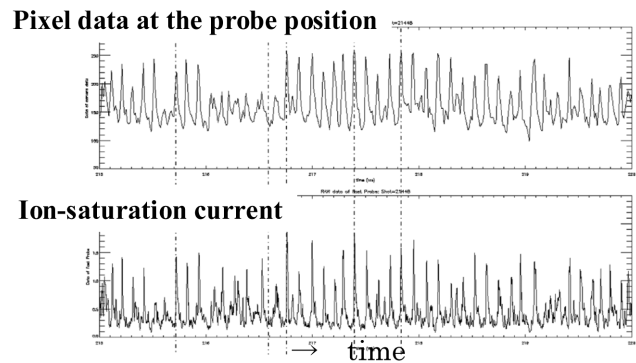


図4. 高速ビデオ画像から得られた発光強度の時間変化と静電プローブで観測したイオン飽和電流波形の比較。

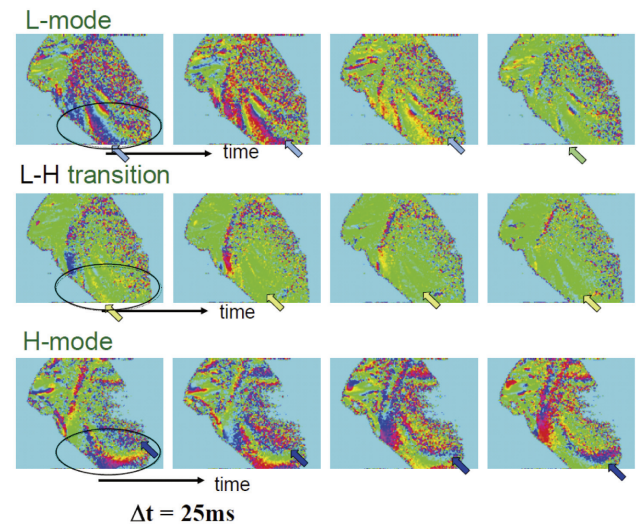


図5. 接線方向に撮影された画像データの二次元位相図の例(ECHプラズマ)。閉じ込め状態の異なる時間帯で、フィラメント構造の移動方向が異なっている。

たプラズマ挙動を二次元画像として捉えることが、より身近なものとなってきています。受動的観測は、「見えるものしか見えない」という側面はありますが、高速ビデオイメージにより通常は見えないものが見えてくるということは、研究者の興味を掻き立て、未知の物理現象を解明するための新たなアイデアを生み出す原動力となっています。

ヘリオトロンJでの高速ビデオカメラを利用した計測は、まだ始まったばかりですが、今回紹介したような興味深い現象を明らかにしてきました。高速ビデオイメージデータに加え、他の計測データを併用することにより、より正しい理解を得ることが出来ると期待されます。今後は、視線を工夫して、フィラメント構造のトラス全体としての動きを特定して行くことが要求されています。また、フィラメント構造の径方向位置の変化も同定できるような工夫も必要でしょう。そのためには、複数の方向からの同時観測により、トモグラフ手法による空間構造解析が望まれます。また、分光的手法を利用することにより、その動きの速度を推定することや、プラズマ密度と電子温度を分離した計測も視野に入れて研究を進めています。現在は、可視領域での発光が比較的強い周辺プラズマへの応用を行っていますが、より高時間分解で撮影するためには、あるいは、分光的手法を取り入れることを考えると、必ずしも十分な光量があるわけではありません。中性ガスを少量加えることによる発光強度の増強や光増倍素子によるイメージ増強が必要です。また、可視域の発光の少ない高温プラズマ領域における現象を可視化するためには、蛍光物質を利用して短波長域の光を可視域に変換する技術や光増倍素子によるイメージ増倍技術を併用することで、より広い範囲での応用が考えられます。

## 参考文献

- [1] 核融合エネルギーフォーラム ITER・BA技術推進委員会 ロードマップ等検討ワーキンググループ 報告書「トカマク型原型炉に向けた開発実施のための人材計画に関する検討報告書」(2008年6月)。
- [2] 科学朝日(朝日新聞社)1960年2月号。
- [3] M. Wakatani, et al., Nucl. Fusion 40 (2000) 569.
- [4] 佐野史道, 他, プラズマ・核融合学会誌, 75 (1999) 222.
- [5] Annual Report of the EURATOM/UKAEA Fusion Programme 2006/07.
- [6] N. Nishino, T. Mizuuchi, et al., J. Nucl. Matter. 363-365 (2007) 628.
- [7] N. Nishino, T. Mizuuchi, et al., "Measurement of peripheral plasma turbulence using a fast camera in Heliotron J", in Proc. 18th PSI Conf. (Toled, 2008), P3-28.
- [8] F. Sano, T. Mizuuchi, K. Kondo, et al., Nucl. Fusion 45 (2005) 1557.